

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

До друку дозволяю

Проректор НТУ «ХПИ»

проф. Мигущенко Р.П.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям и выполнению контрольных работ

по разделу **«Магнитные цепи. Трансформатор»**

по курсу «Теоретические основы электротехники» для студентов
специальности 141. «Энергетика, электротехника и электромеханика», в том
числе для иностранных студентов.

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 3 от 06.11.2019 г.

Харьков
НТУ «ХПИ»
2019

Методические указания к практическим занятиям и выполнению контрольных работ по разделу курса ТОЭ «Магнитные цепи. Трансформатор» для студентов специальности 141 «Энергетика, электротехника и электромеханика», в том числе для иностранных студентов/ сост. В.М. Боев, В.И. Ревуцкий. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 42 с.

Составители В.М. Боев, В.И. Ревуцкий

Рецензент Борисенко А.Н.

Кафедра теоретических основ электротехники

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные цепи постоянного и переменного (реактивная катушка и трансформатор) магнитного потока являются одним из основных разделов курса “Теоретические основы электротехники”, имеющих важное практическое значение для последующих специальных дисциплин электротехнического профиля.

Проведение практических занятий и контрольных работ по этому разделу должно способствовать усвоению студентом основных законов магнитного поля и законов магнитных цепей, необходимых для понимания принципа работы электротехнических устройств, изучаемых в последующих специальных дисциплинах.

Предлагаемый учебный материал изложен в виде двух разделов, содержащих основные законы магнитного поля и магнитной цепи (с изложением порядка расчета разнотипных магнитных цепей) и собственно заданий по магнитным цепям, что может быть использовано студентом при подготовке к практическим занятиям и контрольной работе по теме “Магнитные цепи. Трансформатор.” Предлагаемый набор задач может быть использован и преподавателями при проведении практических занятий по теме “Магнитные цепи постоянного и переменного магнитного потока.”

1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

1.1. Основные законы магнитного поля

Основной величиной, характеризующей магнитное поле, является индукция магнитного поля, определяемая как сила, действующая на единичный элемент длины проводника с током, равным единице при условии перпендикулярности вектора \vec{B} и проводника с током,

$$\vec{B} = \lim_{(Idl \rightarrow 0)} \frac{d\vec{F}}{Idl}.$$

Это равенство получено из уравнения для силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, (закон Ампера),

$$d\vec{F} = I[d\vec{\ell} \cdot \vec{B}].$$

Для характеристики магнитного поля используют также напряженность магнитного поля \vec{H} [А/м] и намагниченность \vec{M} [А/м], связанные с индукцией \vec{B} [Тл] равенством

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость;

μ – относительная магнитная проницаемость.

Индукцию магнитного поля можно понимать как поверхностную плотность магнитного потока, который определяется по формуле

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \text{ или при } B = \text{const}, \Phi = B \cdot S. \quad (2)$$

Единица измерения потока – Вебер [Вб].

Принцип (закон) непрерывности магнитного потока или принцип замкнутости силовых линий магнитного поля экспериментально установлен Фарадеем, который рассматривал линии магнитного поля как физически существующие нити (трубки) магнитного потока, обладающие тяжением (стремящиеся сократиться) и боковым распором.

Математическое обоснование принципа непрерывности магнитного потока дано Максвеллом. В интегральной форме четвертое уравнение Максвелла совпадает с принципом непрерывности магнитного потока:

$$\oint_S \vec{B} dS = 0. \quad (3)$$

Поток вектора индукции магнитного поля сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю. Другими словами, силовые линии магнитного поля не имеют ни начала, ни конца и являются замкнутыми линиями. Сколько силовых линий вошло в замкнутую поверхность S , столько и вышло. Непрерывность магнитных силовых линий соответствует отсутствию в природе магнитных зарядов (на которых бы начинались и заканчивались силовые линии).

Согласно закону электромагнитной индукции (закону Фарадея) в контуре, охватывающем переменный магнитный поток Φ , наводится ЭДС, равная скорости изменения потока, взятой с обратным знаком

$$e = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Из закона электромагнитной индукции выводится второе уравнение Максвелла.

Если контур состоит из w витков, и все они сцеплены с потоком Φ , то результирующая ЭДС равна

$$e = -w \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (w\Phi) = -\frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (4)$$

Произведение $(w \cdot \Phi) = \Psi$ называют потоком сцепления или полным потоком. Для линейной среды экспериментально установлено, что потокосцепление пропорционально току $\Psi = Li$, где L – коэффициент пропорциональности, который называется индуктивностью или коэффициентом самоиндукции.

Индуктивность зависит от геометрических размеров системы витков с током и от магнитной проницаемости среды. Единица измерения индуктивности – Генри [Гн]. Учитывая равенство $\Psi = Li$, закон электромагнитной индукции принимает вид:

$$e = -L \frac{di}{dt}.$$

В случае двух контуров с магнитной связью имеем:

$$e = -\frac{d\Psi_L}{dt} \mp \frac{d\Psi_M}{dt};$$

$$e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} \mp M \frac{di_2}{dt};$$

$$e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} \mp M \frac{di_1}{dt}$$

где $\Psi_L = Li$, $\Psi_M = Mi$, M – коэффициент взаимной индукции.

Закон полного тока выражает те же опытные факты, что и закон Био-Савара, однако в форме, значительно более удобной для практики. Для замкнутого линейного контура с током I , находящегося в линейной среде, напряженность магнитного поля, создаваемая таким контуром, определяется по закону Био-Савара:

$$\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \oint_l \frac{[\vec{dl} \cdot \vec{r}_0]}{r^2},$$

где \vec{dl} – векторный элемент длины проводника, имеющий направление тока I , м; \vec{r}_0 – единичный вектор, направленный от элемента \vec{dl} к точке наблюдения, [м]; r – расстояние от элемента \vec{dl} до точки наблюдения, [м].

Для любого замкнутого контура l справедлив закон полного тока:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum_k i_k = I$$

или

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I_w. \quad (5)$$

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равна полному току, сцепленному с этим контуром (то есть, равна полному току через любую поверхность, опирающуюся на этот контур). Из закона полного тока выводится первое уравнение Максвелла.

Энергия магнитного поля определяется как интеграл от скалярного произведения векторов \vec{B} и \vec{H}

$$W = \int_V \frac{\vec{B} \vec{H}}{2} \cdot dV = \int_V \frac{\mu_a H^2}{2} \cdot dV,$$

или через индуктивность и потокосцепление

$$W = \frac{L \cdot i^2}{2} = \frac{\Psi \cdot i}{2}.$$

Удельная магнитная энергия (приходящаяся на единицу объема, занятого магнитным полем) это подынтегральное выражение в формуле энергии

$$w' = \frac{B \cdot H}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2}. \quad (6)$$

Сила, действующая в магнитном поле в направлении x , может быть определена как производная от энергии по этому направлению:

$$F = \frac{dW}{dx}.$$

1.2. Закон Ома и законы Кирхгофа для магнитной цепи

Магнитной цепью называется совокупность элементов электротехнических устройств, образующих замкнутый путь, по которому под действием магнитодвижущих сил замыкается магнитный поток.

Конструктивное выполнение магнитной цепи называют магнитопроводом. Магнитопровод входит в состав большинства электрических машин и аппаратов, некоторых измерительных приборов и других электротехнических устройств. Как правило, магнитопровод выполняется из магнитомягких ферромагнитных материалов, обладающих большой магнитной проницаемостью и относительно малым магнитным сопротивлением (электротехнические стали, ферриты и др.). Ферромагнитные материалы характеризуются кривой намагничивания или петлей гистерезиса, которые являются нелинейными зависимостями, связывающими индукцию и напряженность магнитного поля $B = f(H)$, (1). Таким образом, магнитная цепь – это нелинейная цепь.

Основными законами магнитной цепи являются:

– Закон Ома:

$$\Phi = F/R_m, \quad (7)$$

где Φ – магнитный поток, проходящий через поперечное сечение магнитопровода; $F = Iw$ – магнитодвижущая сила (МДС) или намагничивающая сила («ампервитки»); R_m – магнитное сопротивление замкнутой цепи, или участка магнитной цепи.

В общем случае магнитное сопротивление определяется по формуле:

$$R_M = \frac{\oint \vec{H} d\vec{l}}{\Phi} = \frac{\oint \vec{B} d\vec{l}}{\mu_0 \Phi},$$

которая, для участка цепи с постоянным магнитным потоком (2), сводится к следующему выражению:

$$R_M = \frac{l}{\mu_0 S}.$$

– Законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа выводится из закона непрерывности магнитного потока (3) и формулируется следующим образом. Алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в узле разветвленной магнитной цепи, равна нулю.

$$\sum_K \Phi_K = 0. \quad (8)$$

Второй закон Кирхгофа получают из закона полного тока (5):

$$\sum_K H_K \ell_K = \sum_K I_K w_K,$$

или

$$\sum_K U_{MK} = \sum_K F_K. \quad (9)$$

Алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль замкнутого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитодвижущих сил вдоль этого контура. Падение магнитного напряжения можно записать как произведение потока на магнитное сопротивление

$$U_M = Hl = \frac{B}{\mu_a} l = \Phi \frac{l}{\mu_a S} = \Phi R_M.$$

Тогда формула второго закона Кирхгофа будет иметь вид:

$$\sum_K \Phi_K R_{MK} = \sum_K I_K w_K \quad (10)$$

В формулах законов Ома и Кирхгофа для магнитной цепи наблюдается формальная аналогия с законами Ома и Кирхгофа для электрической цепи (нелинейной). Аналогом тока электрической цепи является поток магнитной цепи, аналогом ЭДС – МДС, электрическому сопротивлению соответствует магнитное сопротивление. Поэтому все методы расчета нелинейных

электрических цепей применимы и для магнитных цепей. Нелинейную электрическую цепь (или нелинейный участок цепи) характеризуют вольт-амперной характеристикой $U = f(I)$. Магнитную цепь (или участок цепи) характеризуют вебер-амперной характеристикой $\Phi = f(U_M)$ или $\Phi = f(I)$.

1.3. Вебер-амперная характеристика

Вебер-амперная характеристика строится для участка магнитной цепи с одним магнитным потоком, как зависимость потока от падения магнитного напряжения на этом участке $\Phi = f(U_M)$, или для неразветвленной магнитной цепи в целом, как зависимость магнитного потока от намагничивающего тока $\Phi = f(I)$ или от МДС $\Phi = f(Iw)$.

В первом случае задаются несколькими значениями магнитного потока или индукции (например, для электротехнических сталей в пределах $B=0\div 1,5$ Тл), по которым определяют падение магнитного напряжения $U_M = \sum_K H_K l_K$ и строят зависимость $\Phi = f(U_M)$. При этом величины напряженности магнитного поля H_K на участках из ферромагнитного материала определяются по кривой намагничивания, а на участках воздушного зазора по формуле

$$H = \frac{B}{\mu_0}.$$

Во втором случае задаются несколькими значениями потока и определяют необходимую для проведения этого потока МДС, как сумму падений магнитного напряжения на всех участках замкнутой неразветвленной цепи. Например, рассчитаем вебер-амперную характеристику для участка магнитной цепи состоящего из ферромагнетика (кривая намагничивания – таблица 1, рисунок 1), имеющего поперечное сечение $S = 5 \text{ см}^2$ и длину $\ell = 15$ см, и воздушного зазора в нем длиной $\delta = 0,005$ см (один стержень магнитопровода с воздушным зазором).

Порядок расчета проиллюстрируем для значения индукции $B = 0,5$ Тл:

- определяем магнитный поток $\Phi = B \cdot S = 0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 25 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$;
- падение магнитного напряжения в ферромагнетике

$H \cdot l = 40 \cdot 0,15 = 6 \text{ А}$ (по кривой намагничивания таблица 1, рисунок 1, значению $B = 0,5 \text{ Тл}$ соответствует $H = 40 \text{ А/м}$);

– падение магнитного напряжения в воздушном зазоре

$$H_{\delta} \cdot \delta = \frac{B}{\mu_0} \delta = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 20 \text{ А/м} \text{ (полагаем } S_{\delta} = S, \text{ тогда } B_{\delta} = B, \text{ т.к. магнитный}$$

поток один и тот же $\Phi = B \cdot S = \Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot S_{\delta}$);

– падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи в целом

$$U_M = H \cdot l + H_{\delta} \cdot \delta = 26 \text{ А/м.}$$

Аналогично рассчитываем падение магнитного напряжения и поток для других значений индукции. Результаты расчета приведены в таблице 1.

По данным таблицы 1 строится вебер-амперная характеристика $\Phi = f(U_M)$, рисунок 1, по которой можно определить магнитное падение напряжения U_M , то есть ту часть МДС Iw , которая необходима для проведения заданного потока Φ через данный участок магнитной цепи.

Другими словами, вебер - амперная характеристика показывает, какую часть МДС необходимо израсходовать на проведение магнитного потока Φ через данный участок магнитной цепи.

Таблица 1

B , Тл	H , А/м	Φ , $B\delta \cdot 10^{-5}$	H_{δ} , А/м $\cdot 10^5$	$H \cdot l$, А	$H_{\delta} \cdot \delta$, А	U_M , А
0,5	40	25	4	6	20	26
0,8	130	40	6,4	19,5	32	51,5
1,0	300	50	8	45	40	85
1,1	440	55	8,8	66	44	110
1,2	700	60	9,6	105	48	153
1,3	1080	65	10,4	162	52	214
1,4	1800	70	11,2	270	56	326

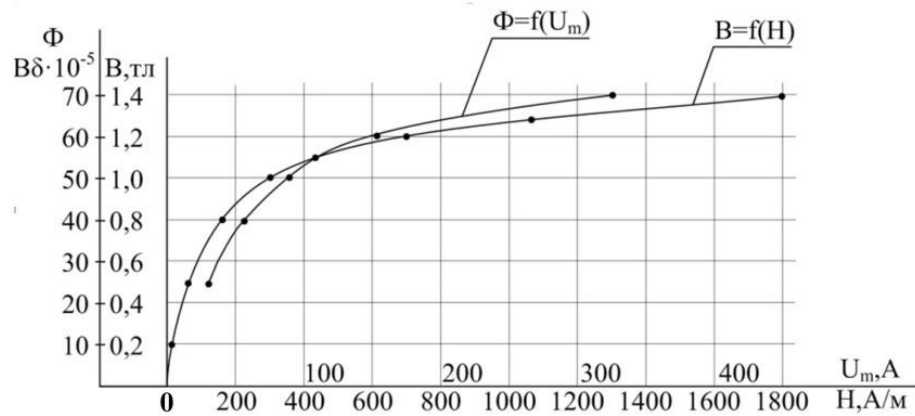


Рисунок 1

1.4. Магнитные цепи с постоянным магнитным потоком

При расчете магнитных цепей различают два типа задач: прямую и обратную.

Прямая задача расчета магнитной цепи заключается в определении МДС (или тока, если известно число витков) по заданным геометрическим размерам, материалу магнитопровода и величине магнитного потока (или магнитной индукции).

В обратной задаче расчета магнитной цепи требуется, по заданной МДС (или току, если известно число витков), геометрическим размерам, материалу магнитопровода, определить магнитный поток (или магнитную индукцию).

1.4.1. Порядок расчета неразветвленной магнитной цепи

Решение *прямой задачи для неразветвленной магнитной цепи* сводится к: разбиению цепи на однородные участки, определению их длины и сечений, вычислению на них магнитной индукции (для нескольких значений потока), определению напряженности магнитного поля (по кривой намагничивания для участков из ферромагнитного материала и – расчетным путем – для участков из неферромагнитных материалов и воздушных зазоров), вычислению падений магнитного напряжения на участках.

Искомую МДС определяют на основании закона Ома или второго закона Кирхгофа для неразветвленной замкнутой магнитной цепи, а ток – как отношение этой МДС к числу витков.

Обратную задачу для неразветвленной магнитной цепи решают графоаналитическим методом с помощью построения магнитной характеристики $\Phi = f(I_w)$ (вебер-амперная характеристика), по которой по заданной МДС $F = I_w$ определяют искомый магнитный поток. Для построения этой характеристики задаются несколькими значениями магнитного потока и находят соответствующие им МДС, как это было указано при решении прямой задачи.

Для уверенности в том, что искомый магнитный поток попадает на построенный участок магнитной характеристики, рекомендуется в качестве первого приближения Φ' принимать значение магнитного потока, найденного при условии, что магнитными сопротивлениями ферромагнитных участков можно пренебречь по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора. Все последующие значения магнитного потока должны быть меньше Φ' , поскольку это заведомо завышенное значение потока (не учтено магнитное сопротивление ферромагнитных участков цепи). Для решения этой задачи применяют и другие графоаналитические методы по аналогии с расчетом нелинейных неразветвленных электрических цепи постоянного тока, например, метод пересечений, а также метод последовательных приближений.

1.4.2. Порядок расчета разветвленной магнитной цепи

При расчете разветвленных магнитных цепей, прежде всего, обращают внимание на форму магнитопровода и количество источников МДС (обмоток). Если разветвленная магнитная цепь обладает симметрией относительно некоторой оси как с точки зрения геометрической формы магнитопровода, так и с точки зрения расположения обмоток, величины и направления, создаваемых ими МДС, то расчет такой цепи фактически сводится к расчету неразветвленной магнитной цепи.

В других случаях расчет разветвленных магнитных цепей осуществляется на основании первого и второго законов Кирхгофа для магнитной цепи. Для составления уравнений по этим законам рекомендуется предварительно составить схему замещения рассматриваемой магнитной цепи.

Если разветвленная магнитная цепь содержит лишь одну обмотку, то прямую задачу расчета такой цепи решают непосредственно вычислением падения магнитных напряжений на отдельных участках этой цепи с последующим их суммированием и определением искомой МДС (или тока).

В других случаях как прямую, так и обратную задачи расчета разветвленной магнитной цепи решают графоаналитическими методами с помощью расчетов и построения магнитных характеристик $\Phi = f(\sum H_k \ell_k)$ отдельных ветвей магнитной цепи с использованием законов Кирхгофа.

1.5. Магнитные цепи с постоянными магнитами

Магнитные цепи с постоянными магнитами широко применяются в электрических аппаратах, бесконтактных электрических машинах и других электротехнических устройствах, в которых для создания магнитного поля в некотором воздушном зазоре используются постоянные магниты. Постоянные магниты изготавливают из магнитотвердых ферромагнитных материалов, которые, в отличие от магнитомягких, обладают полого поднимающейся основной кривой намагничивания и большой площадью петли гистерезиса. Для постоянных магнитов используются мартенситные стали (хромистая, вольфрамовая, платинокобальтовая и др.), ферриты с широкой петлей гистерезиса (например, бариевые ферриты), специальные сплавы (самарий-кобальт, платина-кобальт и др.).

1.5.1 Принцип действия магнитной цепи с постоянным магнитом.

Принцип действия поясним на примере кольцевого сердечника, рисунок 2, а, выполненного из магнитотвердого материала.

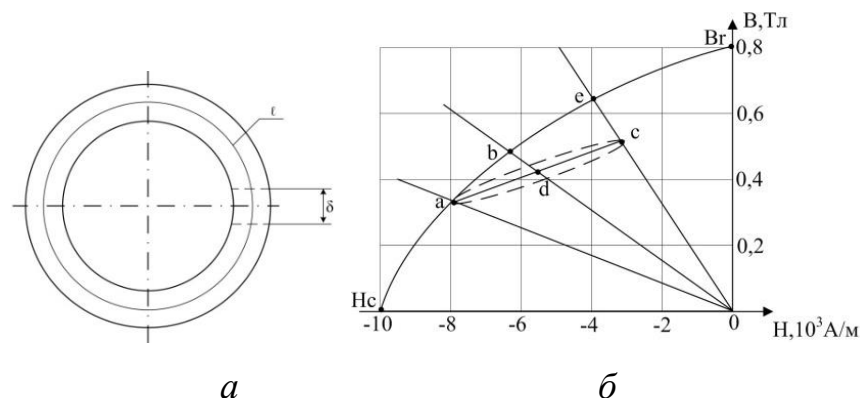


Рисунок 2

На сердечник намотаем обмотку равномерно по окружности и пропустим по ней ток такой величины, чтобы намагнитить сердечник до насыщения. При этом индукция магнитного поля в теле сердечника определяется, как результат действия двух магнитодвижущих сил: обмотки и намагниченного сердечника

$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{H} + \bar{M}) = \mu_0 \bar{H} (1 + k_M) = \mu_a \bar{H}.$$

Здесь \bar{M} – вектор намагниченности сердечника, равный объемной плотности магнитных моментов намагниченного вещества сердечника $\left[\frac{A_M^2}{M^3} = A/M \right]$, величина которого пропорциональна намагничивающему полю, то есть индукции B или напряженности H магнитного поля:

$$\bar{M} = k_M \bar{H},$$

где k_M – коэффициент магнитной восприимчивости вещества сердечника, величина безразмерная.

Напряженность магнитного поля, создаваемого в сердечнике обмоткой с током, определяется из второго закона Кирхгофа для магнитной цепи:

$$H\ell = Iw,$$

где ℓ – длина средней силовой линии, м.

После удаления обмотки с током, магнитное поле в сердечнике будет определяться только остаточной намагниченностью сердечника M_0 , то есть индукция магнитного поля будет равна:

$$\bar{B}_r = \mu_0 M_0.$$

На рисунке 2б указана точка индукции остаточного намагничивания B_r , соответствующая $H = 0$. Если вырезать теперь в сердечнике, рисунок 2а, ферромагнетик и сделать воздушный зазор величиной δ , то величина магнитного поля в сердечнике станет меньше B_r , как из-за уменьшения объема намагниченного вещества, так и из-за увеличения магнитного сопротивления магнитному потоку, вследствие появления воздушного зазора. При этом процесс уменьшения индукции будет идти по нисходящей части петли гистерезиса, рисунок 2, б, от точки B_r до точки a или b (в зависимости от

величины воздушного зазора). Нисходящая часть петли гистерезиса во втором квадрате (от точки B_r до точки H_c) называется кривой размагничивания и используется при расчете магнитной цепи с постоянным магнитом.

В воздушном зазоре энергия магнитного поля может превращаться в другие виды энергии, например, в механическую.

1.5.2 Порядок расчета магнитной цепи с постоянным магнитом

По второму закону Кирхгофа (в соответствии с законом полного тока), составленному для замкнутого контура ℓ в магнитной цепи, рисунок 2, а, имеем:

$$H_{ст}(\ell - \delta) + H_{\delta} \cdot \delta = 0 \quad (11)$$

где $H_{ст}$, H_{δ} – напряженность магнитного поля в сердечнике и зазоре соответственно.

Если пренебречь потоком рассеяния (что допустимо при малом воздушном зазоре $\delta \ll \ell$), то магнитный поток в любом сечении магнитопровода один и тот же, то есть, магнитный поток в сердечнике $\Phi = S_{ст} \cdot B_{ст}$ и поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta} = S_{\delta} B_{\delta}$ будут одинаковыми, следовательно:

$$B_{ст} S_{ст} = B_{\delta} S_{\delta}; B_{\delta} = B_{ст} \frac{S_{ст}}{S_{\delta}} \quad (12)$$

Из равенств (11), (12) следует, что

$$-H_{ст} = H_{\delta} \frac{\delta}{\ell - \delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \frac{\delta}{\ell - \delta} = B_{ст} \frac{S_{ст} \delta}{\mu_0 S_{\delta} (\ell - \delta)} \quad (13)$$

То есть, напряженность магнитного поля в стали сердечника направлена встречно напряженности магнитного поля в воздушном зазоре и индукции магнитного поля (в стали и зазоре).

Уравнение (13) описывает линейную зависимость. Другая (нелинейная) зависимость описывается кривой размагничивания, рисунок 2,б. По уравнению (13) строится прямая линия (oa – на рисунке 2,б). Точка a пересечения этой прямой с кривой размагничивания и будет рабочей точкой магнитной цепи для данного воздушного зазора.

Если теперь уменьшить воздушный зазор вставкой из магнитомягкого ферромагнетика до величины $\delta_1 < \delta$, то процесс пойдет из точки a , рисунок 2, b , не в точку b , (или e – в зависимости от величины зазора δ), а по нижней ветви частной петли гистерезиса $a-c$. Если убрать вставку, то обратный процесс возврата в точку a идет по верхней ветви частной петли гистерезиса $c-a$.

Обычно частную петлю гистерезиса заменяют прямой линией $a-c$, которая называется «прямой возврата» и строится параллельно касательной к петле гистерезиса в точке B_r . Для магнитной цепи с зазором δ_1 во втором законе Кирхгофа

$$H_{ct}(\ell - \delta) + H_M(\delta - \delta_1) + H_\delta \delta = 0$$

обычно пренебрегают падением магнитного напряжения $H_M(\delta - \delta_1)$ в магнитомягкой вставке и используют второй закон Кирхгофа (11). Если новый воздушный зазор δ_1 таков, что ему соответствует прямая ob на рисунке 2, b (построенная по уравнению (13) при зазоре δ_1), то рабочая точка магнитной цепи переместится в точку d . Если бы мы сразу сделали воздушный зазор, равный $\delta_1 < \delta$, то рабочей точкой была бы точка b . Но под действием случайных «промышленных помех», способных изменить магнитное поле в сердечнике (например, до напряженности $H_{ct} = 8000$ А/м), рабочая точка может переместиться в некоторую другую точку кривой размагничивания (в точку a , например). После прекращения действия «помехи» процесс не вернется в точку b , а окажется в точке d и нормальная работа магнитной цепи (и всего устройства) будет нарушена.

Таким образом, точка b является неустойчивой, а для рабочей точки d не страшны «помехи», не выводящие ее левее точки a , вследствие чего она называется стабилизированной рабочей точкой постоянного магнита (цепи).

На практике постоянные магниты в магнитной цепи снабжаются наконечниками из магнитомягкого ферромагнетика, которые, кроме стабилизации рабочей точки, позволяют легко получить требуемую форму воздушного зазора, так как магнитомягкие материалы значительно легче поддаются механической обработке, чем магнитотвердые. Перевод рабочей точки магнитной цепи из нестабилизированного положения точки b в

стабилизированное (точка d) может осуществляться и без изменения зазора, но с помощью временной размагничивающей обмотки, переводящей рабочую точку b в положение точки a . После удаления обмотки рабочая точка займет стабилизированное положение точки d .

Энергия магнитного поля, заключенная в воздушном зазоре магнитной цепи, равна

$$W_M = \frac{B_\delta H_\delta}{2} S_\delta \delta.$$

Выражая здесь B_δ и H_δ через B_{ct} , H_{ct} в соответствии с (11), (12) получим

$$W_M = \frac{B_{cm} H_{cm}}{2} S_{cm} (\ell - \delta).$$

Разделив на объем постоянного магнита $V = S_{cm}(1 - \delta)$, получим удельную объемную энергию, то есть энергию, отдаваемую единицей объема магнита во внешнее пространство (воздушный зазор)

$$W'_M = \frac{B_{cm} H_{cm}}{2}.$$

На кривой размагничивания материала постоянных магнитов имеется точка, где произведение, $B_{ct} \cdot H_{ct}$ а, следовательно, и удельная энергия максимальны. Зная координаты этой точки (B_m , H_m) на кривой размагничивания, можно по заданному магнитному потоку $\Phi = \Phi_\delta$ и размерам воздушного зазора S_δ и δ определить оптимальные размеры магнита (используя (11), (12)):

$$S_{ct} = \frac{\Phi_\delta}{B_m}; l_{cm} = 1 - \delta = \frac{H_\delta \cdot \delta}{H_m} = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0 H_m} = \frac{\Phi_\delta \delta}{\mu_0 S_\delta H_m} = R_M \frac{\Phi_\delta}{H_m}.$$

здесь $R_M = \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta}$ – магнитное сопротивление воздушного зазора.

Механическая сила, действующая в воздушном зазоре, может быть определена как производная от энергии магнитного поля воздушного зазора по направлению перемещения x :

$$F = \frac{dW_M}{dx}$$

1.6. Магнитные цепи с переменным магнитным потоком

Магнитопровод с переменным магнитным потоком имеют такие широко применимые устройства, как трансформатор, реактивная катушка со стальным сердечником (дроссель), различного назначения электрические аппараты, питаемые переменным током (напряжением). Отличительной особенностью магнитной цепи с переменным магнитным потоком является наличие потерь активной энергии (мощности) в стальном магнитопроводе. Потери на гистерезис в магнитопроводе пропорциональны частоте и квадрату индукции магнитного поля (в пределах индукций $0,8 \div 1,6$ Тл)

$$P_{\Gamma} = k_{\Gamma} B_m^2 f G_{cm}, \text{ Вт}$$

Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты и индукции

$$P_B = k_B B_m^2 f^2 G_{cm}, \text{ Вт}.$$

В этих формулах (формулы Штейнмеца):

k_{Γ}, k_B – коэффициенты, зависящие от марки стали;

B_m – амплитудное значение индукции в стали, Тл;

G_{cm} – вес магнитопровода, кг;

f – частота тока обмотки, а значит и потока в магнитопроводе, Гц.

В государственных стандартах на электротехнические стали приводятся общие удельные потери p_0 [Вт/кг] для различных значений индукции B_m и частоты f . При этом суммарные потери в стали (на гистерезис и вихревые токи) приближенно могут быть определены по формуле (для частоты $f = 50$ Гц):

$$P = P_{\Gamma} + P_B = P_0 B_m^2 G_{cm},$$

где P_0 – удельные потери для индукции $B_m = 1$ Тл и частоты $f = 50$ Гц.

Для уменьшения потерь в стали магнитопровод выполняется шихтованным, то есть набранным из тонких (0,5 мм или 0,35 мм) изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Рассмотрим магнитную систему двухобмоточного трансформатора, рисунок 3.

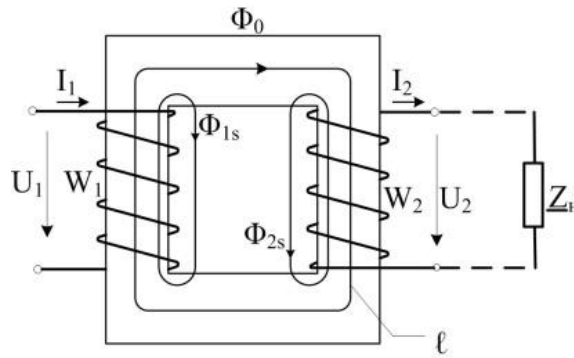


Рисунок 3

Подаваемое на первичную обмотку гармоническое напряжение U вызывает в обмотке ток I , который создает магнитный поток, состоящий из основного магнитного потока Φ_0 и потока рассеяния Φ_{1s} . Основным магнитный поток вызывает в первичной обмотке ЭДС самоиндукции e_1 , во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции e_2 (в соответствии с законом электромагнитной индукции (4)):

$$e_1 = -\frac{d\Psi_{10}}{dt} = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt},$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_{20}}{dt} = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}.$$

Если вторичная обмотка замкнута на нагрузку Z_H , то ЭДС взаимной индукции вызывает в ней ток I_2 , который создает свой магнитный поток, направленный практически встречно потоку Φ_0 первичной обмотки.

Таким образом, в режиме нагрузки основной магнитный поток Φ_0 есть результат действия двух намагничивающих сил $I_1 w_1$ и $I_2 w_2$. При этом основной магнитный поток Φ_0 в режиме номинальной нагрузки незначительно отличается от основного магнитного потока Φ_0 в режиме холостого хода.

Магнитный поток рассеяния имеет сложную картину распределения в пространстве, но в расчетах, исходят из предположения, что каждая из обмоток имеет свой поток рассеяния (рисунок 3), зависящий только от одного тока I_1 или I_2 соответственно.

В реальных трансформаторах, в целях уменьшения потока рассеяния, первичную и вторичную обмотки помещают на одном стержне магнитопровода.

В режиме холостого хода, когда вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$), магнитный поток создается только первичной обмоткой. Второй закон Кирхгофа для контура первичной обмотки имеет вид:

$$R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = u_1 = U_{1m} \sin \omega t, \quad (14)$$

где R_1 – активное сопротивление первичной обмотки;

$\psi_1 = \psi_{10} + \psi_{1s}$ – потокосцепление первичной обмотки;

ψ_{10} – потокосцепление основного магнитного потока Φ_0 ;

ψ_{1s} – потокосцепление потока рассеяния Φ_{1s} .

Потокосцепление ψ_{10} нелинейно зависит от тока, поэтому его записывают в зависимости от потока Φ_0 , а потокосцепление рассеяния Φ_{1s} пропорционально току i_1 , так как поток рассеяния Φ_{1s} замыкается через немагнитную линейную среду (рисунок 3):

$$\psi_{10} = w_1 \Phi_0,$$

$$\psi_{1s} = L_{1s} i_1.$$

Подставляя в уравнение (14), получим

$$R_1 i_1 + w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} + L_{1s} \frac{di_1}{dt} = u_1 \quad (15)$$

Второй закон Кирхгофа для вторичной цепи:

$$R_2 i_2 + L_{2s} \frac{di_2}{dt} + u_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} \quad (16)$$

Второй закон Кирхгофа для магнитопроводатрансформатора:

$$H_0 \ell = i_1 w_1 + i_2 w_2,$$

где H_0 – напряженность поля от основного магнитного потока Φ_0 .

Но такой же основной поток с той же напряженностью H_0 может быть создан одной обмоткой с числом витков W_1 и некоторым фиктивным током i_0 :

$$H_0 \ell = i_0 w_1$$

Из двух последних равенств получим уравнение намагничивающих сил

$$i_0 w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2 \quad (17)$$

В режиме холостого хода, т.е. когда $i_2=0$ (реактивная катушка) ток $i_0=i_{1xx}$, то есть это намагничивающий ток, так как он создает основной магнитный поток Φ_0 с напряженностью H_0 .

В режиме нагрузки намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток направлены почти встречно. Если последнее уравнение записать в комплексной форме

$$\underline{I}_0 w_1 = \underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2$$

то векторная диаграмма будет выглядеть следующим образом, рис. 4:

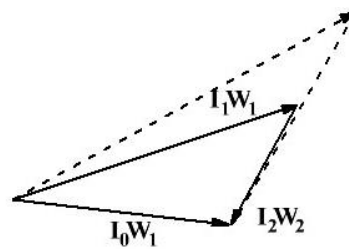


Рисунок 4 – Векторная диаграмма

В трансформаторе с увеличением тока I_2 (с изменением нагрузки) должен уменьшаться основной магнитный поток, так как уменьшается суммарная МДС $I_0 w_1$, а, значит, уменьшается и противо – ЭДС $-e_1 = w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}$, и, в соответствии с уравнением (15), должен возрасти ток I_1 , т.к. напряжение U_1 осталось прежним.

В результате получается почти линейная зависимость I_1 от I_2 (хотя трансформатор – нелинейный элемент). При этом намагничивающий ток $I_0 w_1$ остается практически неизменным (см. векторную диаграмму). В правильно спроектированном трансформаторе намагничивающий ток, а, значит, и основной магнитный поток в режиме холостого хода и в режиме номинальной нагрузки практически одинаковы. Так как в уравнении (15) падение напряжения в обмотке значительно меньше ЭДС

$$\left| R_1 i_1 + L \frac{di_1}{dt} \right| \ll |e|$$

то его приближенно можно записать следующим образом:

$$U_1 \approx U_0 = -e_1 = w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}$$

Отсюда следует, что при гармоническом (синусоидальном) приложенном напряжении основной магнитный поток Φ_0 тоже будет практически синусоидален, а значит, синусоидальными будут и ЭДС e_1 и e_2 .

Если нагрузка линейна, то и создаваемый ЭДС e_2 ток I_2 также будет гармонический. Негармоническим будет только ток намагничивания I_0 , но он значительно меньше тока I_1 . Если этот малый ток заменить эквивалентной синусоидой, то и первичный ток будет практически гармоническим (т.к. его можно рассматривать как сумму I_2 и I_0).

Таким образом, для уравнений трансформатора (15-18) можно применять метод комплексных амплитуд:

$$\begin{aligned} 1) \underline{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_{1S}) \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 2) \underline{E}_2 &= (R_2 + j\omega L'_{2S}) \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_2 \\ 3) \underline{E}_1 &= -j\omega w_1 \Phi_0 \\ 4) \underline{E}_2 &= -j\omega w_2 \Phi_0 \\ 5) \underline{I}_0 w_1 &= \underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 \end{aligned}$$

где

$j\omega L_{1S} = jX_{1S}$ - индуктивное сопротивление первичной обмотки;

$j\omega L_{2S} = jX_{2S}$ - индуктивное сопротивление вторичной обмотки.

1.6.1 Уравнения приведенного трансформатора

В трансформаторах с большим коэффициентом трансформации первичные и вторичные напряжения и токи могут отличаться в десятки и сотни раз. В практических расчетах оперирование такими величинами могут привести к дополнительным ошибкам. Кроме того, векторные диаграммы в одном масштабе невозможно построить. Поэтому пересчитываются вторичные параметры на количество витков первичной обмотки. Такой трансформатор называется приведенным. Приведенные величины будем обозначать со штрихом: $w'_2 = w_1$.

Основной магнитный поток в приведенном трансформаторе должен оставаться таким же (а для этого намагничивающая сила вторичной обмотки должна оставаться такой же) как в реальном трансформаторе, т.е.

$I_2' w_2' = I_2 w_2$ или $I_2' w_1 = I_2 w_2$, тогда $I_2' = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{n}$, где $n = \frac{w_1}{w_2}$,

$$\underline{E}_2' = -j\omega w_2' \Phi_0 = -j\omega w_1 \Phi_0 = \underline{E}_1;$$

$$\underline{E}_2' = -j\omega w_1 \Phi_0 \frac{w_2}{w_2} = -j\omega w_2 \Phi_0 \frac{w_1}{w_2} = E_2 n.$$

Подставим во второе уравнение $E_2 = \frac{E_2'}{n}; I_2 = I_2' n$:

$$\underline{E}_2 = \frac{\underline{E}_2'}{n} = (R_2 + jX_{2s}) I_2' n + \underline{U}_2, \text{ тогда } \underline{E}_2' = (R_2 + jX_{2s}) I_2' n^2 + n \underline{U}_2.$$

Приведенное напряжение на нагрузке:

$$\underline{U}_2' = n \underline{U}_2 = n \underline{Z}_H I_2 = n^2 \underline{Z}_H I_2'.$$

Приведенные сопротивления:

$$n^2 \underline{Z}_H = \underline{Z}_H', R_2' = R_2 n^2, X_{2s}' = X_{2s} n^2.$$

Уравнение намагничивающих сил $I_0 w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2$ разделим на w_1 , тогда

$$I_0 = I_1 + I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_1 + I_2'.$$

Запишем систему уравнений приведенного трансформатора:

$$\begin{aligned} 1) \underline{U}_1 &= (R_1 + jX_{1s}) \cdot I_1 - \underline{E}_1 \\ 2) \underline{E}_2' &= (R_2' + jX_{2s}') \cdot I_2' - \underline{U}_2' \\ 3) \underline{E}_1 &= \underline{E}_2' = -j\omega w_1 \Phi_0 \\ 4) \underline{I}_0 &= I_1 + I_2' \end{aligned} \quad (19)$$

1.6.2 Векторная диаграмма и схема замещения приведенного трансформатора.

По уравнениям (19) можно построить векторную диаграмму и схему замещения. Порядок построения векторной диаграммы следующий:

- 1) в масштабе токов откладываем вектор тока I_2' по вещественной оси, т.е. примем начальную фазу тока $\Psi = 0$;
- 2) в масштабе напряжений под углом φ_H откладываем напряжение \underline{U}_2' ;
- 3) по уравнению (2) системы (19) к вектору \underline{U}_2' прибавляем векторы активного и реактивного падений напряжения вторичной обмотки и получаем ЭДС \underline{E}_2' ;

- 4) в соответствии с уравнением (3) системы (19) проводим вектор потока, опережающий на 90° ЭДС $E_2' = E_1$;
- 5) под углом потерь α ($5-8^\circ$) к вектору магнитного потока проводим вектор намагничивающего тока I_0 ;
- 6) по уравнению (4) системы (19) строим вектор $I_1 = I_0 - I_2'$;
- 7) по уравнениям (1) системы (19), прибавляя к вектору $U_0 = -E_1$ падения напряжения на активном и реактивном сопротивлениях первичной обмотки, получаем U_1 – напряжение источника.

Построим качественно векторную диаграмму, считая величину нагрузки известной: $U_2, I_2, \varphi_H > 0, U_2' = U_2 \cdot n, I_2' = \frac{I_2}{n}$.

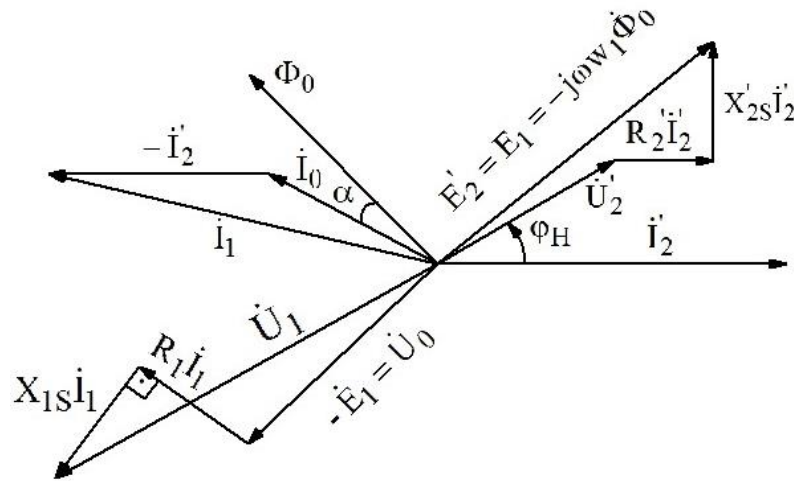


Рисунок 5

Можно было начинать построение с вектора U_2 , направив его горизонтально, тогда вся векторная диаграмма будет повернута на угол φ_H по часовой стрелке.

Схема замещения трансформатора должна соответствовать уравнениям (19). Рассмотрим Т-образную схему замещения трансформатора, рис. 6. Второй закон Кирхгофа для левого контура схемы соответствует первому уравнению системы (19), если учесть, что $U_0 = -E_1$.

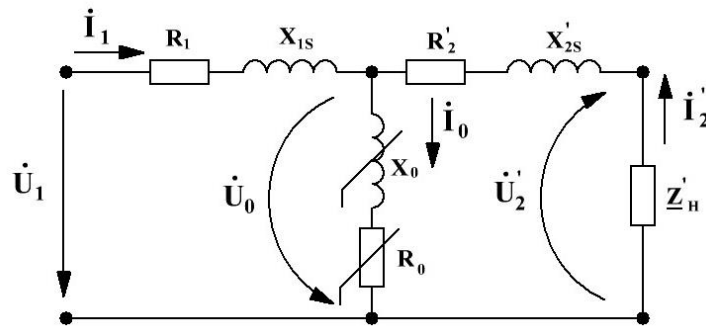


Рисунок 6

Параллельная ветвь на рис. 6 характеризует процессы в магнитопроводе $\underline{U}_0 = (R_0 + jX_0)\underline{I}_0$ и определяет мощность потерь в стали $\underline{P}_0 = \underline{U}_0^* \underline{I}_0 = R_0 I_0^2 + jX_0 I_0^2 = P_{cm} + jQ_{ст}$.

Второй закон Кирхгофа для правого контура схемы замещения соответствует второму уравнению системы (19):

$$\dot{U}_0 + \dot{U}_2 + (R_2' + jX_{23}') \cdot \dot{I}_2 = 0 \text{ или } -\dot{U}_0 = \dot{E}_2' = (R_2' + jX_{23}') \cdot \dot{I}_2 + \dot{U}_2'.$$

Первый закон Кирхгофа соответствует четвертому уравнению системы (19).

Параллельная ветвь, соответствующая магнитопроводу, может быть представлена параллельным участком, рис. 7.

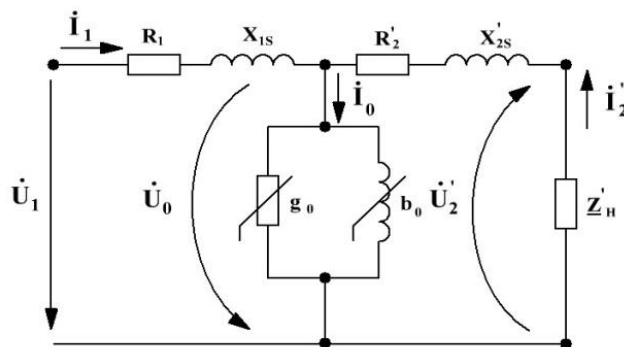


Рисунок 7

Зная параметры схемы замещения и величины на нагрузке, то есть U_2 , I_2 , Φ_m , можно рассчитать режим работы трансформатора на любую нагрузку, т.е. найти первичные ток и напряжение, мощность и КПД. Параметры схемы замещения могут быть найдены расчетным или экспериментальным путем. Экспериментально найти параметры проще, так как для расчета реактивных

сопротивлений рассеяния X_{1S} и X_{2S} необходимо рассчитать распределение потока рассеяния в трехмерном пространстве трансформатора, а это является сложной полевой задачей.

1.6.3 Экспериментальное определение параметров схемы замещения по опытам ХХ и КЗ.

1) Холостой ход ($I_2=0$). Уравнения (19) принимают вид:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{10} &= (R_1 + jX_{1S})\underline{I}_{10} - \underline{E}_1, \\ \dot{E}_2' &= \dot{U}_{20}; E_1 = -j\omega w_1 \Phi_0, \\ \underline{I}_{10} &= \underline{I}_0.\end{aligned}$$

Им соответствует схема на рис. 8

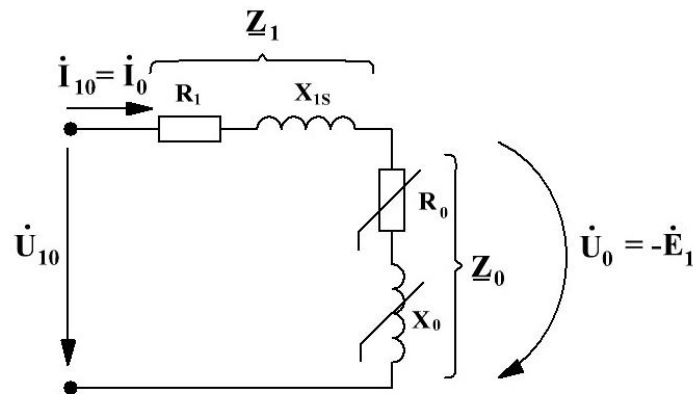


Рисунок 8

Так как ток холостого хода $I_{10} = I_0$ значительно меньше номинального тока, то падением напряжения в обмотке можно пренебречь, и в первом уравнении останется только ЭДС:

$$|(R_1 + jX_{1S})I_1| \ll E_1, \text{ то } U_{10} \approx -E_1 = U_0 = \omega w_1 \Phi_0.$$

Ему соответствует схема на рис. 9.

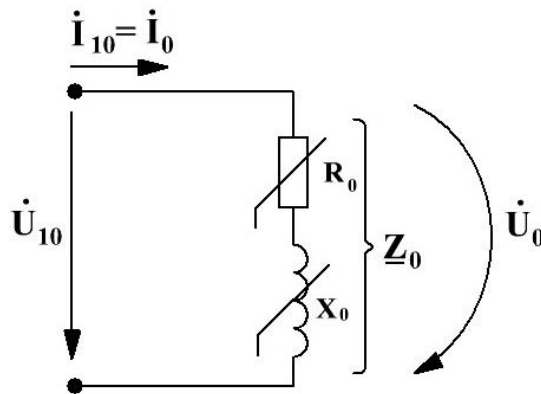


Рисунок 9

В схеме остались только сопротивления, характеризующие магнитопровод. Для того, чтобы намагничивающий ток I_0 и определяемый им магнитный поток Φ_0 были такими же, как и при номинальном режиме опыт холостого хода делается при номинальном напряжении U_1 .

При этом потери в стали магнитопровода в опыте холостого хода и в номинальном режиме будут практически одинаковыми. Поэтому мощность опыта холостого хода называют мощностью потерь в стали. В опыте холостого хода измеряют величины:

$$\begin{cases} U_{10} = U_{1H} \\ I_{10} = I_0 \\ U_{20} = E_2 \\ P_{10} = P_{cm} \end{cases}$$

Из этих данных определяют коэффициент трансформации:

$$n = \frac{U_{10}}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega w_1 \Phi_0}{\omega w_2 \Phi_0} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Входное сопротивление и угол сдвига фаз определяем по результатам измерений:

$$Z_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}}, \quad \varphi_{10} = \arccos \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}}.$$

Тогда комплекс входного сопротивления будет равен \underline{Z}_0 , рис. 9.

$$\underline{Z}_{10} = Z_{10} e^{j\varphi_{10}} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \underline{Z}_0 = R_0 + jX_0.$$

2) Опыт короткого замыкания ($U_2=0$). Уравнения (19) принимают вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= (R_1 + jX_{1s}) \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2' &= (R_2' + jX_{2s}') \underline{I}_2' = \underline{E}_1 = -j\omega w_1 \underline{\Phi}_0 \\ \underline{I}_0 &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2' \end{aligned}$$

Им соответствует схема, рис. 10.

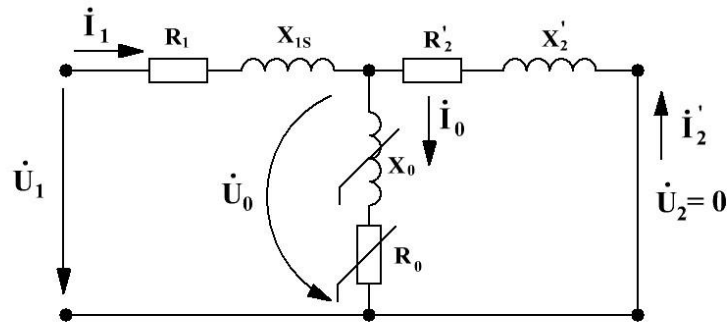


Рисунок 10

Опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении, так как при номинальном напряжении токи I_1 и I_2 были бы чрезмерно большими, и трансформатор может выйти из строя (перегореть).

Ток намагничивания I_0 и при номинальном напряжении мал по сравнению с I_1 и I_2 , поэтому при пониженном напряжении этим током можно пренебречь, а значит, и пренебречь процессами в магнитопроводе. При $I_0 \approx 0$ схема, рис. 10, преобразуется в последовательную цепь, рис. 11:

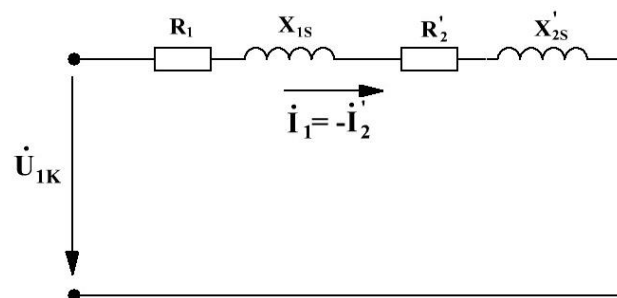


Рисунок 11

В схеме остаются только сопротивления, характеризующие первичную и вторичную обмотки. И чтобы потери в обмотках были равны потерям в номинальном режиме, опыт короткого замыкания проводится при таком пониженном напряжении, чтобы ток был номинальным. Исходя из этого, мощность при опыте короткого замыкания называют **мощностью потерь в меди трансформатора**.

В опыте короткого замыкания измеряют:

$$\begin{cases} U_{1K} \ll U_{1H} \\ I_{1K} \approx I_{1H} \\ P_{1K} = P_M \end{cases}$$

Находим входное сопротивление:

$$Z_{1K} = Z_{1K} e^{j\varphi_{1K}} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} e^{j \arccos \frac{P_{1K}}{U_{1K} I_{1K}}} = (R_1 + R_2') + j(X_{1S} + X_{2S}')$$

где

$$R_1 + R_2' = Z_{1K} \cos \varphi_{1K}; X_{1S} + X_{2S}' = Z_{1K} \sin \varphi_{1K}.$$

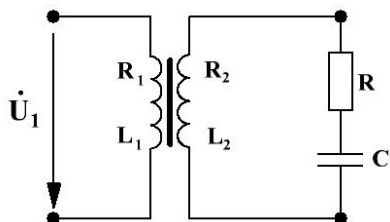
В правильно спроектированном трансформаторе приведенные вторичные сопротивления равны соответствующим первичным сопротивлениям. Тогда

$$R_1 = R_2' = \frac{Z_{1K} \cos \varphi_{1K}}{2}, X_{1S} = X_{2S}' = \frac{Z_{1K} \sin \varphi_{1K}}{2}.$$

Каждый трансформатор снабжается заводской табличкой, на которой приведены паспортные данные, включающие номинальные мощность и напряжение, а также данные опытов холостого хода и короткого замыкания, по которым мы можем рассчитать параметры схемы замещения. Зная параметры нагрузки, можно рассчитать соответствующий режим работы, а также КПД.

2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ «МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ. ТРАНСФОРМАТОР»

№1

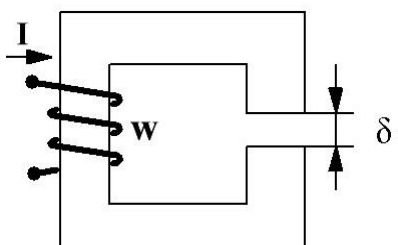


замещения известны.

1. По уравнениям трансформатора и заданной нагрузке построить векторную диаграмму.

2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , η по заданной нагрузке и току I_2 . Параметры схемы

№2



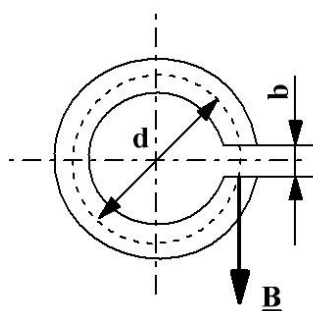
1. Задано: размеры магнитопровода, кривая намагничивания и магнитодвижущая сила $I \cdot w$.

Определить поток Φ_δ .

2. Законы полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной

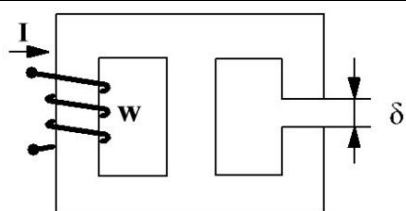
индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№3



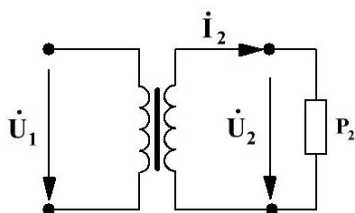
Средний диаметр кольцевого магнита с узким воздушным зазором “b” равен d. Магнитная индукция в зазоре B. Пренебрегая рассеянием и выпучиванием поля на краях зазора, найти модули векторов \vec{H} и \vec{j} внутри вещества (материала?).

Кривая размагничивания задана.

**№4**

Задано: размеры магнитопровода, кривая намагничивания, индукция в зазоре B_δ . Найти Iw .

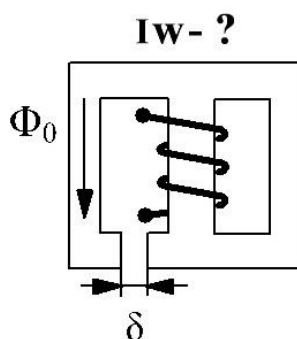
Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№5

Дано: паспортные данные; U_2 ; I_2 ; P_2 . Найти:

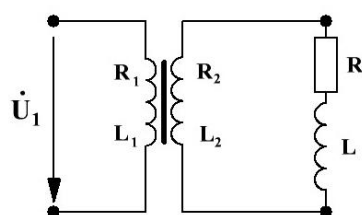
1. U_1 (первичное напряжение), η (КПД).
2. Построить векторную диаграмму при емкостной нагрузке ($X_C = R/\sqrt{3}$), используя

уравнения трансформатора.

№6

1. Составить законы Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

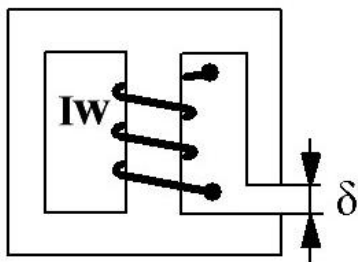
2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№7

$$R\sqrt{3} = 3\omega L.$$

1. По уравнениям трансформатора и заданной нагрузке построить ВД.
2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , η по заданной нагрузке и току I_2 . Параметры схемы замещения известны.

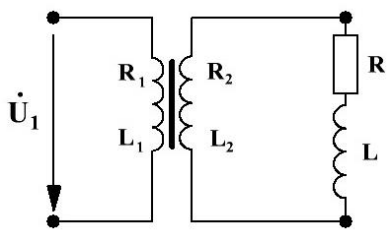
№8



1. Составить законы Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№9



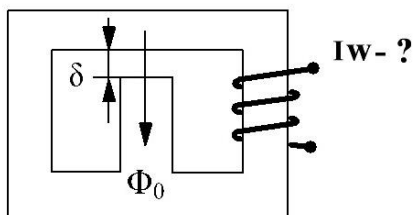
$$\frac{\omega L}{R\sqrt{3}} = \frac{1}{3}.$$

Дано: паспортные данные (опыты ХХ и КЗ).

Найти: 1. Параметры эквивалентной схемы.

2. Используя уравнения трансформатора, построить векторную диаграмму.

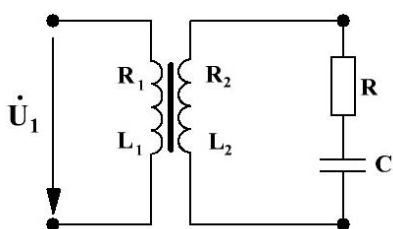
№10



1. Составить законы Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения

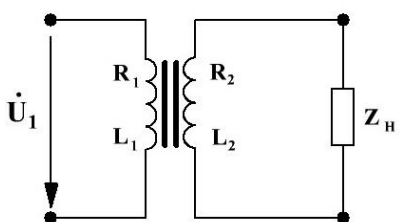
№11



$$\frac{1}{\omega C} = 2R.$$

1. Для данной схемы трансформатора, используя уравнения трансформатора, построить векторную диаграмму.
2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , η по заданной нагрузке и току I_2 . Параметры схемы замещения известны.

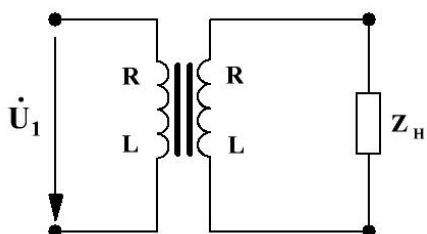
№12



$$\varphi_H = 30^\circ.$$

1. Записать уравнения трансформатора и построить векторную диаграмму.
2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , η по заданной нагрузке и току I_2 . Параметры схемы замещения известны.

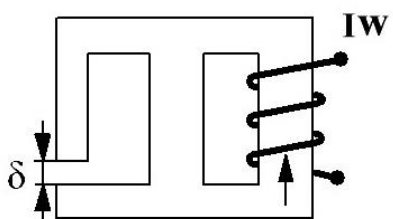
№13



$$\varphi_H = -30^\circ.$$

1. Записать уравнения трансформатора и построить векторную диаграмму.
2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , η по заданной нагрузке и току I_2 . Параметры схемы замещения известны.

№14



1. Составить законы Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.
2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

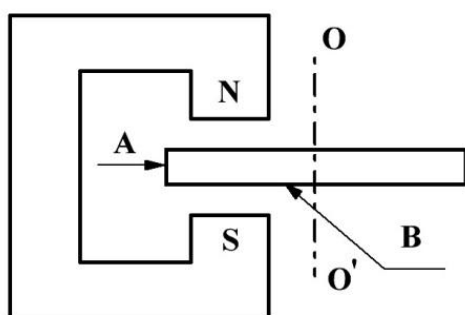
№15



На рисунке изображена магнитная система измерительного прибора, состоящая из подковообразного постоянного магнита, наконечников и якоря (выполненных из магнитомягкого материала). Задана кривая размагничивания постоянного магнита и

размеры: $l_{\text{ст.}}$ – длина средней силовой линии постоянного магнита; $2l_{\text{н}}$ – длина силовой линии по наконечникам; d – диаметр якоря; 2δ – длина пути по воздушным зазорам. Намагничивание до насыщения проведено при вынутом якорь. Определить рабочую точку после возвращения якоря на место. Коэффициент прямой возврата K задан.

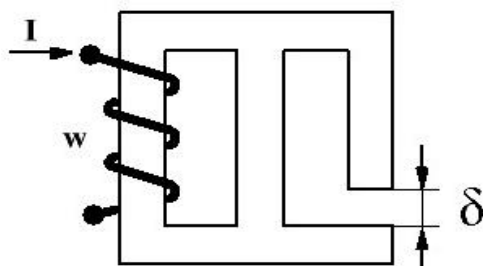
№16



Изображенную на рисунке магнитную цепь можно понимать как схематическое изображение конструкции униполярного генератора: если вращать проводящий диск в зазоре постоянного магнита, то в нем наводится ЭДС, и с помощью щеточных контактов **A** и **B** можно снимать

напряжение. Постоянный магнит был намагничен до насыщения при отсутствии диска. При этом суммарный воздушный зазор равен δ . Затем в зазор вставлен диск из магнитомягкого материала, и зазор уменьшился до $\delta_1 < \delta$. Определить рабочую точку, считая размеры и кривую размагничивания заданными. Коэффициент прямой возврата K задан.

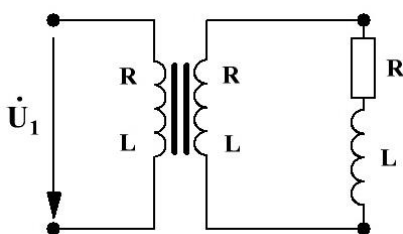
№17



1. Составить законы Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

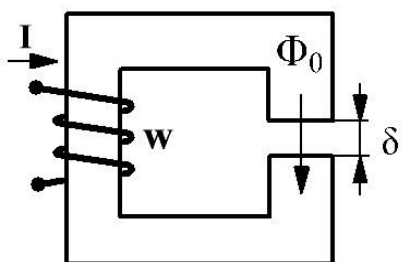
№18



$$\omega L = \frac{R}{\sqrt{3}}.$$

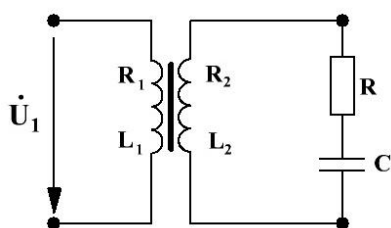
1. Записать уравнения трансформатора и построить ВД.
2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , η по заданной нагрузке и токе I_2 . Параметры схемы замещения известны.

№19



1. Составить закон Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

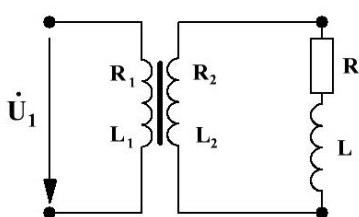
2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№20

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{R}{\sqrt{3}}.$$

1. Для данной схемы трансформатора, используя уравнения трансформатора, построить векторную диаграмму.

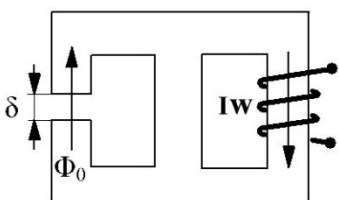
2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , η по заданной нагрузке и току I_2 . Параметры схемы замещения известны.

№21

$$R\sqrt{3} = \omega L.$$

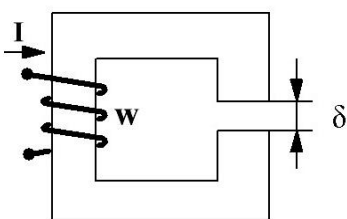
1. По уравнениям трансформатора и заданной нагрузке построить ВД.

2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , η по заданной нагрузке и току I_2 . Параметры схемы замещения известны.

№22

1. Записать законы Кирхгофа для магнитной цепи и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

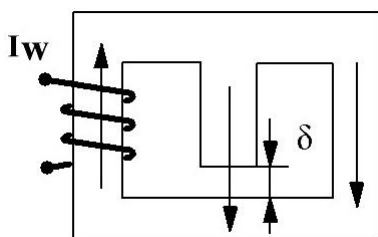
2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№23

1. Задано: размеры магнитопровода, кривая намагничивания, индукция в воздушном зазоре B_δ . Найти Iw .

2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

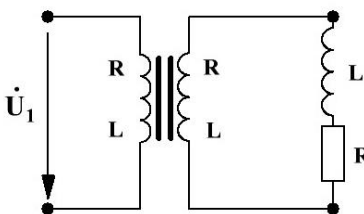
№24



1. Составить законы Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№25

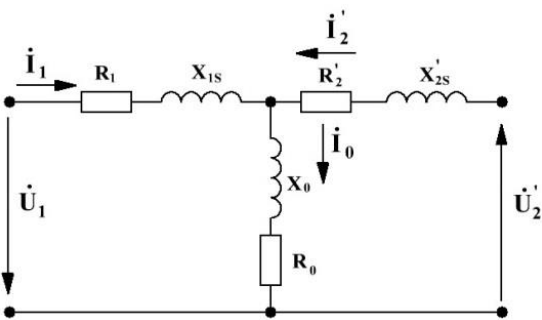


$$\omega L = R.$$

1. Записать уравнения трансформатора и построить ВД.

2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , и η по заданной нагрузке и токе I_2 . Параметры схемы замещения известны.

№26

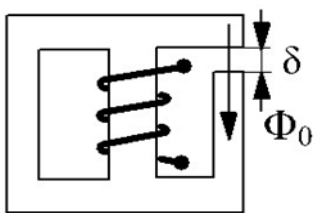


Трансформатор с ферромагнитным сердечником имеет такие данные опытов Х.Х. и К.З.:

Холостой ход	Короткое замыкание
$U_{10} = U_{1H}$	U_{1K}
U_{20}	$I_{1K} = I_{1H}$
I_{10}	P_{1K}
$P_{10} = P_{CT}$	

1. Определить параметры схемы замещения трансформатора по данным опытов ХХ и КЗ. 2. Используя уравнения трансформатора, построить векторную диаграмму.

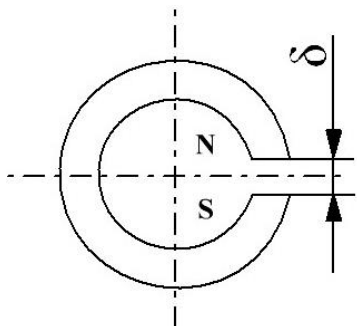
№27


 $Iw - ?$

1. Составить законы Кирхгофа и определить МДС, если известен магнитный поток в воздушном зазоре. Размеры и кривая намагничивания магнитопровода заданы.

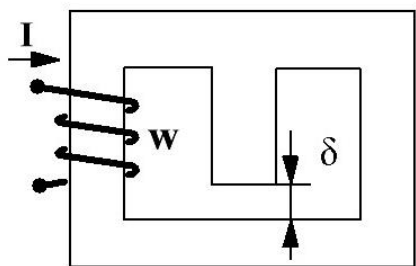
2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№28



Заданы размеры и кривая размагничивания постоянного магнита. Как изменится положение рабочей точки, если в зазор помещена вставка из магнитомягкого материала толщиной $\delta_1 \leq \delta$? Где будет рабочая точка, если вставку убрать? Коэффициент прямой возврата К.

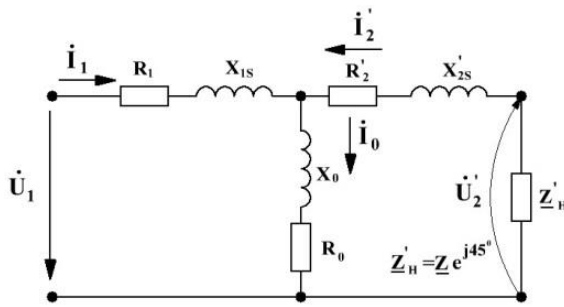
№29



1. Известны размеры и материал магнитной цепи. Задана намагничивающая сила Iw . Определить потоки.

2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

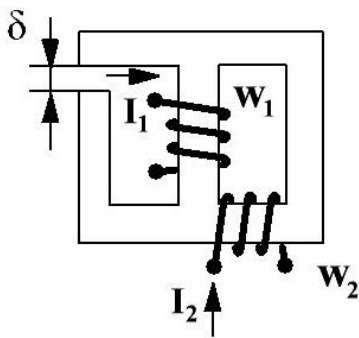
№30



Дано: параметры схемы замещения трансформатора, сопротивление нагрузки и ток через нее (Z_H и I_2' соответственно). Коэффициент трансформации известен.

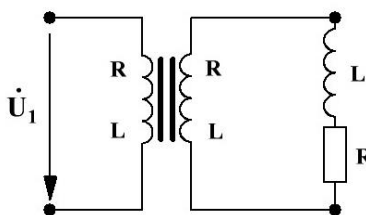
1. Определить напряжение U_1 и мощность, потребляемую от источника (в общем виде).
2. Построить векторную диаграмму, используя уравнения трансформатора.

№31



Известны размеры и материал магнитопровода. Заданы намагничивающие силы $I_1 w_1$, $I_2 w_2$. 1. Определить магнитные потоки. 2. Закон полного тока, непрерывности магнитного потока и закон электромагнитной индукции (формулы и физический смысл). Пояснить рисунком или примером применения.

№32



$$\omega L = 2R.$$

1. Записать уравнения трансформатора и построить ВД.
2. Привести порядок расчета U_1 , I_1 , P_1 , P_2 , и η по заданной нагрузке и токе I_2 . Параметры схемы замещения известны.

Список литературы

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 2-х т. Учебник для вузов. Том 2. - «Теория нелинейных электрических и магнитных цепей»; «Теория электромагнитного поля»— 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.
2. Бессонов Л.А. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: учебное пособие для студентов энергетических и приборостроительных специальностей вузов. — 2-е изд., перераб. и доп./ Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди и др.; Под ред. Л.А. Бессонова. — М.: Высшая школа, 1980. — 472 с.: ил.
3. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие для вузов / Под ред. проф. П.А. Ионкина. — М.: Энергоиздат, 1982. — 768 с., ил.

Содержание

Введение.....	3
1. Основные законы магнитного поля и магнитной цепи.....	4
1.1.Основные законы магнитного поля.....	4
1.2. Закон Ома и законы Кирхгофа для магнитной цепи.....	7
1.3. Вебер-амперная характеристика.....	9
1.4. Магнитные цепи с постоянным магнитным потоком.....	11
1.4.1.Порядок расчета неразветвленной магнитной цепи.....	11
1.4.2. Порядок расчета разветвленной магнитной цепи.....	12
1.5. Магнитные цепи с постоянными магнитами.....	13
1.5.1 Принцип действия магнитной цепи с постоянным магнитом.....	13
1.5.2 Порядок расчета магнитной цепи с постоянным магнитом.....	15
1.6. Магнитные цепи с переменным магнитным потоком.....	18
1.6.1 Уравнения приведенного трансформатора.....	22
1.6.2 Векторная диаграмма и схема замещения приведенного трансформатора.....	23
1.6.3 Экспериментальное определение параметров схемы замещения по опытам ХХ и КЗ.....	25
2. Задания для контрольной работы по теме «Магнитные цепи. Трансформатор».....	30
Список литературы.....	40

БОЄВ Вячеслав Михайлович, РЕВУЦЬКИЙ Віталій Ігорович

МАГНІТНІКОЛА. ТРАНСФОРМАТОР

Методичні вказівки до практичних занять виконання контрольних робіт за розділом курсу «ТОЕ» «Магнітні кола. Трансформатор» для студентів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», у тому числі студентів-іноземців

Російською мовою

Відповідальний за випуск проф. М.М. Резинкіна

Роботу до видання рекомендував проф. А.М. Борисенко

В авторській редакції

План 2019 р., поз. 17а

Підп. до друку 2019 р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.
Наклад 30 прим. Зам. № Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Друкарня